



THEME 03

수소공급용 배관재료 고찰

김 우 식 | 한국가스공사 연구개발원, 수석연구원 | e-mail : wskim@kogas.re.kr

수소 공급을 위해서는 수소 수송 인프라 구축이 효과적인 방안이 될 수 있다. 산업원료와는 달리 에너지원으로서 수소를 사용할 때에는 불특정 범위의 일반 소비자들에게 공급되어야 하며, 생산, 저장, 이용시스템과 함께 공급시스템이 구축되어야 한다. 이 글에서는 수소시스템과 수소수송배관 특징, 수소취성 기본개념 및 수소수송 배관재료 요구조건 등을 알아보도록 한다.

수소 공급시스템 소재

수소시스템 재료 지침을 작성할 때에는 설계 및 운용 조건에 적합한 특성과 운용환경 적합성을 고려해야 한다. 이를 위해 선택재료의 시험데이터를 확인하고 가공, 조립 및 검사의 용이성을 검토해야 한다. 또한 부식 저항성, 파손결과 영향, 독성영향, 수소취성, 수소화염에서 고온노출 가능성, 저온취성, 열전도, 저온특성 변화, 비용 등에 대한 분석이 있어야 한다.

수소는 두 가지 측면에서 재료에 영향을 미친다. 우선 액체형태 수소를 저장할 때 저온에서 나타나는 저온취성이다. 이는 수소에 한정된 영향은 아니며 연성취성 천이온도 이하에서 운영되는 초저온 액체에서 모두 나타난다. 온도가 감소하면 면심입방금속의 경우 인성이 약간 감소하고, 페라이트강과 같은 체심입방금속의 경우 인성감소가 매우 심하게 나타난다. 알루미늄, 구리, 니켈, 오스테나이트계 스테인리스강 등이 저온에서 사용된다. 두 번째는 수소가 금속재료의 기계적 특성을 열화시켜 파괴에 이르게 하는 수소취성이다. 수소원자는 고체금속 안으로 용해되며 분산격자 내에 축적되어 결합에너지를 감소시켜 연성을 저하시키고 취성파괴 가능성을 높이며, 인장응력이 작용될 때 예기치 못한 파괴가 갑자기 발생된다. 균열을 발생시키는 임계응력

은 재료의 인장응력보다 작아, 파손은 설비의 상당한 변형이나 명백한 퇴화없이 발생된다. 수소 시스템에 사용하는 소재는 응력, 압력, 온도, 노출 조건의 상호작용 하에서 인장강도, 파괴인성, 균열진행, 피로, 굽힘, 파괴거동을 포함한 평가과정을 거친 후에 선택해야 한다.

수소를 사용하는 배관설비는 온도, 압력, 배관에 작용하는 하중 및 수소취성을 설계에 반영해야 한다. 수소배관 관련지침은 배관, 튜브, 플랜지, 볼트, 개스킷, 밸브 등 모든 수소수송 관련설비에 적용된다. 1938년 최초 수소배관이 독일에서 240m 시공된 이래 2005년 기준으로 미국에 약 1,450km, 유럽에 약 1,500km의 저압수소배관이 있는데, 이 배관들은 특정 공정플랜트들 사이에 원료 수소를 수송하는 것이고 에너지로서 사용하는 것은 아니다. 배관 설계압력은 1MPa 이하부터 10MPa 이상까지 다양하며, 탄소강 또는 스테인리스강이 배관재료로 이용된다. 탄소강의 경우 고압력 가스배관으로 사용되는 API 5L 또는 ASTM 재료들이 이용된다.

수소수송 배관 일반

수소의 생산지와 이용하는 곳 사이의 거리는 몇 센티미터에서 수천 킬로미터까지 다양하게 분포할 수 있다.

많은 경우에 배관을 통한 에너지 공급이 타 운반수단보다 효과적이고 안전하다. 만일 수소가스가 이미 존재하는 천연가스 공급배관으로 운반될 수 있다면 매우 효율적인 방법이 될 것이다. 그러나 천연가스와 수소의 혼합공급의 경우, 배관의 안전성 확보, 건전성 유지 및 연소특성 검증이 전제되어야 한다. 또한 수소는 부피당 에너지밀도가 천연가스의 1/3이므로 주어진 배관 관경으로 같은 양의 에너지를 공급하기 위해서는 더 높은 고압 또는 약 20% 더 큰 관경이 필요하다. 공급압력이 증가하면 수소공급에 사용되는 배관장치는 용접부, 열영향부 및 모재에서 수소취성에 노출된다. 이러한 문제로 수소가스를 소비자들에게 공급하기 위해서는 새로운 인프라시스템이 필요하다.

미국 에너지성에서는 배관을 통한 수소 수송을 위해 배관재료 연구를 수행하고 있다. 여기에는 고압수소 환경에서 기존 상용배관재료의 수소취성 특성 규명, 현재 천연가스배관에서 수소침투를 최소화시키는 박막 코팅재료 개발, 고압수소를 운반할 신규배관 인프라에 적합한 강재조성 및 용접재료 규격제정, 신규배관 건설비용과 기존배관 개량비용 및 비용절감 방안 규명 등이 포함된다.

ASME에서 기존규격인 B31(piping and pipelines)의 하위항목 B31.12(Hydrogen Piping and pipelines, 2008)를 수소배관 규격으로 제정하였다. 이 규격은 EIGA에서 발간한 Hydrogen Transportation Pipelines, IGC Doc 121/04/E, (2004) 보고서를 근간으로 수소 생산조건, 공급절차, 수송, 분배, 상업적 활용, 주거지역 활용, 설비건설, 운영, 유지 및 완성품 요구특성 등이 포함되어 있다. 규격구성은 공통 섹션과 A(Industrial Piping), B(Pipelines and Distribution Piping), C(Residential piping) 세 가지 섹션으로 되어 있다. 공통부분은 코드 목적, 재료, 용접과 성형, 운영과 유지내용이 포함되어 있다.

수소배관 규격 제정 위원회에서 관심을 갖는 사항이

크게 두 가지 있다. 하나는 수소배관을 제작하는 재료의 문제이고, 다른 하나는 수소배관에 대한 지식을 일반인에게 전달하는 것이다. 현재 배관재료를 수소 환경에서 사용하면 재료 파열강도와 인성이 각각 15%와 30% 정도로 급감하는 현상이 발생하여 수소를 배관을 통해 안정적으로 공급하는 데 어려움이 예상된다. 재료 파괴인성을 약화시키는 원인인 수소피로균열성장률과 수소취성에 대한 규정을 제정하는 것이 B31.12에서도 중요한 이슈로 언급되고 있다. 유리섬유강화 플라스틱(FRP) 배관을 도입하는 것이 합금강보다 수소 환경 저항성이 더 좋은지, 기존 금속배관을 대체할 때 이점이 무엇인지, 라이너 재료 선정, 예상 설계수명 등에 대한 연구가 수행되고 있다. 또한 현재 사용되는 배관재료가 고압 수소 환경에서 피로와 충격강도의 열화정도를 확인하고, 반복하중 발생이 파괴에 민감한 용접부에 미치는 영향을 파악하고, 용접 시 열처리와 용접 후열처리의 영향을 검토하고 있다.

수소수송배관 해외 프로젝트 현황

유럽 40개 기관이 함께 수행한 Naturally 프로젝트는 순수 수소만을 위한 새로운 수송과 분배 시스템 개발에 막대한 투자가 필요하기 때문에 기존 천연가스 배관 네트워크의 사용방안을 검토한 것이다. 이 프로젝트에서는 수소수요가 아직 낮고 수소공급이 기존 천연가스 네트워크에 병행해서 이루어지며 천연가스와 수소가 모두 이용되는 수소경제 전환기에 수소/천연가스 혼합 수송 시스템을 효과적인 방안으로 제시하고 있다. 네덜란드 Gasunie Research가 프로젝트를 주관하며 2005년부터 5년 동안 과제를 수행하였다. 세부 실행과제로서는 기술적 상황 정의, 예상 시스템의 사회적 경제적 분석, 수명주기 평가, 수소 분리장치 개발, 관련자 교육 및 동기부여, 관련 표준과 규제 현황 평가, 의사결정 지원방안 개발 등 8개가 있다.

표 1 미국 에너지성의 수소배관기술 연구주제들 [DOE web.]

Research identifies fundamental mechanism of hydrogen embrittlement and permeation in steel pipelines and identifies promising cost effective measures to mitigate these issues. (2008)
Down-select on materials and/or coatings for hydrogen pipelines. Including the potential use of natural gas pipelines for mixtures of natural gas and hydrogen, or hydrogen alone. (2010)
Go/No-Go on the use of hydrogen and natural gas mixtures in the existing natural gas pipeline infrastructure as an effective means of hydrogen delivery. (2010)
Verify 2012 targeted cost and performance for hydrogen pipelines. (2012)
By 2012, reduce the cost of hydrogen transport from central and semi-central production facilities to the gate of refueling sites to <\$0.90/gge of hydrogen. (2012)
Suitable technology for system mechanical integrity monitoring and leak detection is developed. (2017)
Verify 2017 targeted cost and performance for hydrogen pipelines. (2017)
By 2017, reduce the cost of hydrogen delivery from the point of production to the point of use at refueling sites to <\$1.00/gge. (2017)

미국 에너지성의 수소 에너지 프로그램 중 3.2 section에 해당하는 것이 수소수송이다. 현재 수소수송 방안으로 배관수송, 트럭 및 트레일러 등 차량수송, 기차이용 등이 고려되고 있는데, 장기적으로 가장 경쟁력이 있는 방법은 배관수송으로 제시하고 있다. 배관수송에서 기존 배관에 수소를 직접 공급할 수 없어 새로운 배관을 설치하는 경우 많은 초기비용이 필요하며, 현재 금속 배관은 수소취화로 배관재료 물성 저하가 예상되어 이를 해결해야 한다. 미국 에너지성 과제로 수행 중인 내용을 표 1에 나타내었다.

일본은 NEDO에서 2006년 ~ 2012년까지 수행되는 "Fundamental research project on advanced hydrogen science"에서 수소에너지 사회의 건설을 위해 수소스테이션용 재료를 포함하는 수소 공급 및 저장 재료에 대한 수소취성 연구가 진행되고 있다.

국내에서는 수소공급 배관재료에 대해 수소압력, 농도, 재료물성 등 수소취성에 영향을 끼칠 수 있는 다양한 변수에 대한 체계적인 연구를 아직 수행하지 않은 상태이다.

수소취성

수소는 금속의 기계적 물성을 현저히 약화시키며, 이러한 효과 중 대표적인 것이 수소취성이다. 수소취성은 온도, 압력 등 환경적 요소와 순도, 농도, 수소노출시간 등 수소 영향과 응력상태, 물리적 기계적 물성, 미세조직, 표면조건, 균열형태 등 재료상태에 의한 영향을 받는다.

수소취성은 1900년 초부터 다양한 재료의 용접부에 대해 연구되어 왔지만 아직까지 고압사용 조건에서 배관재료에 대해 수소취성 영향에 대한 연구결과는 부족한 상황이다. 수소취성은 재료 물성, 합금성분, 미세조직, 압력, 응력상태, 온도 등이 복합 작용하므로 유한요소해석 기법이 도입되어 사용되고 있다.

수소취성 형태는 세 가지가 단일 또는 복합 형태로 나타난다. 우선 환경적 수소취성으로 기체수소 환경에서 소성 변형된 금속에서 발생되며, 표면균열 증가, 연성 감소 및 파괴응력 감소를 일으킨다. 균열은 표면에서 시작되며, $10^6 \sim 10^8$ Pa 수소압력과 상온부근에서 쉽게 발생되고, 가스순도와 변형속도가 중요한 인자이며,

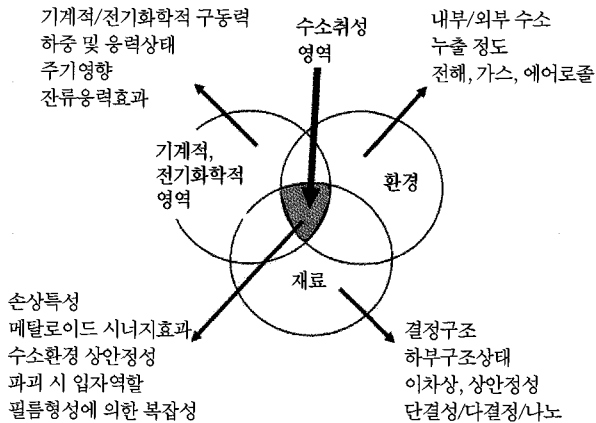


그림 1 수소취성 상호 연관 사항들[Y. Katz et al., Engineering Fracture Mechanics 68 (2001) 619]

-100℃~700℃에서 관찰된다. 둘째로 내부 수소취성이 흡수된 수소에 의해 발생된다. 파괴는 균열이 내부에서 시작되기 때문에 아무런 외부표시가 나타나지 않으며 경고없이 발생된다. 0.1~10ppm 농도와 상온 부근에서 가장 심각하게 발생되며 변형속도가 중요한 인자이다. -100℃~100℃에서 관찰된다. 셋째로 수소반응취성으로 수소가 금속구성물과 반응하여 취성수화물이 생기거나 금속 내 탄소와 반응하여 메탄을 형성할 때 발생한다. 수소반응취성은 상온 이상의 고온에서 발생된다. 수소취성에 대한 금속의 민감도는 금속마다 크게 다르다. 예를 들어 69MPa 수소 분위기의 18Ni-250 마레이징강의 노치시편 강도는 헬륨환경에서 시험한 같은 시험편의 12% 정도를 나타내었지만, 310스테인리스강은 수소 환경에서 원래 강도의 93%를 유지하였다.

수소취성을 제어하는 방안은 고강도강재 사용을 피하고, 배관의 압력주기를 줄이며, 배관재료와 용접부위의 경도를 제한하며, 응력회복 용접, 노말라이징 또는 완전 어닐링된 냉간가공 재료를 사용하여 잔류응력을 최소화시킨다. 수소취성의 영향을 줄이는 방안으로는, 수소공급에 적합하다는 산업적 동의와 충분한 시험데이터가 제공되는 재료 선택, 수소 환경 사용적합성을 위해 제작과 현장시공에 사용되는 용접공정 평가, 응력

집중요인 제거, 적절한 표면 마감, 건전성관리계획 수립, 수소균열과 취성을 사용 중 검사할 수 있는 방안 수립, 수소침입 억제제 사용 등이 있다. 수소취성에 대한 금속재료의 저항성 시험은 ISO 11114에 의해 실시한다. 수소설비의 일반적인 구조용 재료로는 수소취성에 강하며 저온에서 우수한 인성거동을 나타내는 오스테나이트계 스테인리스강을 사용한다. 그림 1에 수소취성과 관련된 현상들을 나타내었다.

수소배관 재료 선정 및 평가

수소수송 배관에서 수소관련 핵심사항은 피로균열, 파괴거동, 용접부, 고압수소, 수소순도 등이다. 수소 환경에서 탄소강 배관재료의 인성은 30% 감소하고, 결합이 있는 배관의 파열강도는 15~20% 감소한다. 기계적 특성이 크게 열화되기 전에 이들 재료를 얼마나 사용하는 것이 가능한가를 결정하는 것이 필요하다. 수소유기 피로균열 성장은 매우 빠르고 탄소강 배관재료의 용접부와 열영향부는 균열발생 가능성이 있으며, 미세합금 배관재료는 수소분위기에서 매우 민감하게 반응할 수 있다. 수소 수송 배관재료의 경우 ① 고압수소 분위기 하에서 배관재료가 피로나 충격강도의 손실이 어느 정도 인지? ② 기계적 특성에 주기적 압력변화는 어떤 영향을 미치는지? ③ 용접부위의 수소영향은 어떻게 나타나는지? 등을 분석하기 위해 관련실험을 하여 데이터를 확보하고 이를 바탕으로 사용여부를 결정해야 한다.

수소 관련 시험은 설비구축부터 매우 어렵다. 그림 2는 미국 SRNL의 고압수소분위기 시험설비로서 수소장입은 10,000psi/350℃, 수소분위기 기계적 특성 시험은 3,000psi/350℃, 파괴인성시험은 C형 시편은 3,000psi/350℃, 소형편치 파괴에너지 측정은 3,000psi/RT, 디스크파단파열시험은 3,000psi/RT, 수소장입 부품 정수압파열시험은 30,000psi까지 수행이 가능하다. 국내에서는 KRISS에 고압수소환경에서 재료역

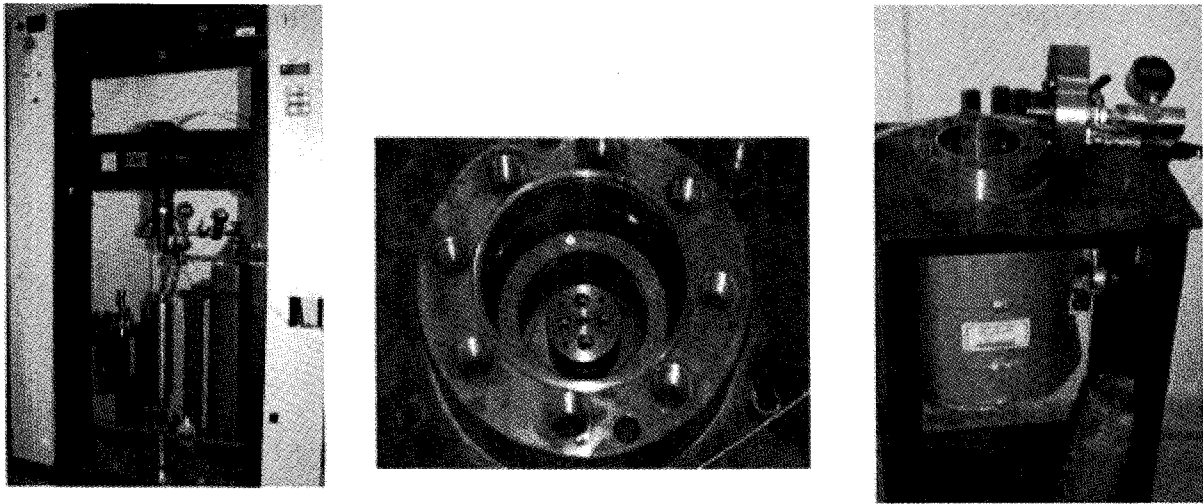


그림 2 고압수소 분위기 시험설비들(SRNL)

학특성 시험설비가 구축되어 운영 중에 있다.

대기 중에서 수소화염 발생 범위는 부피비로 4%에서 74.5%까지 매우 폭넓다. 설계나 운용단계에서 누설된 수소는 보이지 않으며, 설비를 열화 시키고, 폭발까지 갈 수 있으므로 안전 확보를 위해서는 재료선정, 용접시공, 유지보수 단계에서 수소취성이나 누설이 발생하지 않도록 해야만 한다.

수소배관 재료로서 필요한 데이터로는 최소규정항복강도, 최소규정인장강도, 인장강도 대 항복강도 비

율, 화학조성, 용접성, 최소설계온도, 파괴인성, 부식특성, 환경적인 열화발생 억제특성, 주기적 검사를 포함한 손상방지 프로그램 등이 있다. 또한 관련 코드, 표준 및 정부규제를 작성하는데 필요한 데이터를 확보하고, 수소시스템 손상가능성을 최소화시키고 억제하는 방안을 파악하며, 고압수소에 노출된 배관이 어떤 영향을 받는지에 대한 이해가 필요하다.



기계용어해설

압전기(Piezo-electricity)

수정이나 그밖의 결정체에 가하는 압력을 변화시키면 미소한 전하를 발생하는 현상으로 인해 나타나는 전압.

터릿 선반(Turret Lathe)

터릿 절삭공구 또는 터릿이라 하는 회전절삭공구대 둘레에 절삭공구를 방사상으로 장착하고, 터릿을 조금씩 회전시킬 때마다 각 절삭공구가 차례로 절삭부분에 따라서 각자의 위치에 오도록 만든 선반.

광탄성(Photo-elasticity)

에폭시 수지 등의 투명판에 외력을 가하고 이것을 편광에 비추면 나타나는 무늬모양으로 재료에 발생하는 응력상태를 살피는 것.

태코제너레이터(Tachometer Generator)

측정하고자 하는 구동축에 발전기를 장착하고, 발전기에서 발생한 전력을 측정하여 축의 회전수를 측정하는데 쓰이는 속도계용 발전기.